

ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВЕ НА ОСНОВЕ AL – LI – CU – ZR С МАЛЫМИ ДОБАВКАМИ SC И MG

Распосиенко Д.Ю.

Руководитель - старший научный сотрудник, к. т. н. Кайгородова Л.И.

Институт физики металлов УрО РАН, Россия, Екатеринбург, 620041,
ул. С. Ковалевской 18
jjinn@pm.convex.ru

Недостатком сплавов на основе системы Al – Li является низкая пластичность.

Ухудшение пластичности бинарных сплавов Al-Li связывают с локализацией напряжений вблизи границ зерен, возникающей при взаимодействии движущихся дислокаций с упрочняющей фазой δ' (Al_3Li), обладающей упорядоченной L1_2 структурой.

Низкая пластичность многокомпонентных алюминий-литиевых сплавов на основе системы Al – Li – Cu – Zr вызвана, помимо локализации напряжений, выделением фазы T_1 (Al_2CuLi) по границам зерен.

Ранее обнаружено, что образование в сплаве Al – 2% Li – 3% Cu – 0,1% Zr ультрадисперсной кристаллической структуры позволяет устранить структурные факторы, ухудшающие его пластические характеристики: при старении деформированного сплава подавляются образование метастабильной фазы δ' (Al_3Li) и зарождение зернограницных выделений стабильных фаз T_1 (Al_2CuLi) и T_2 (Al_6CuLi_3). Однако зеренной структуры с размером зерен менее 150 нм, независимо от величины приложенной нагрузки и режимов постдеформационного отжига, получить не удалось. В соответствии с этим, представляет интерес изучить действие комплексной добавки Sc + Mg на формирование в этом сплаве нанокристаллической структуры и выявить взаимосвязь ее дисперсности с фазовыми превращениями.

Состав легирующей добавки обусловлен тем, что скандий является эффективным модификатором литой структуры и способствует повышению температуры рекристаллизации деформированных полуфабрикатов, магний изменяет растворимость основных легирующих элементов лития и меди в алюминии.

Для получения нанокристаллической структуры исследуемый сплав подвергался деформации сдвигом под давлением на наковальнях

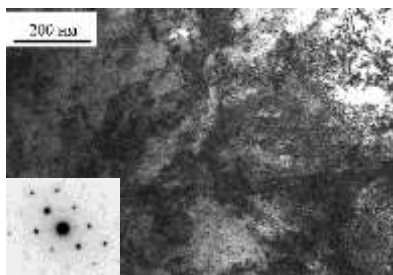


Рис. 1. Микроструктура сплава Al – 2%, Li – 3%, Cu – 0,1%, Zr.

Светлопольное изображение ячеистой структуры после деформации $P = 4$ ГПа, $\phi = 0,5 \pi$ рад и электронограмма со сверхструктурными рефлексами.

разориентировок между ячейками (рис. 1). Внутри ячеек видны частицы равноосной формы. Присутствие на электронограммах сверхструктурных рефлексов типа 100, 110 свидетельствует о том, что эти частицы являются так называемыми дисперсойдами $Al_3(Zr,Sc)_x$ с упорядоченной $L1_2$ структурой.

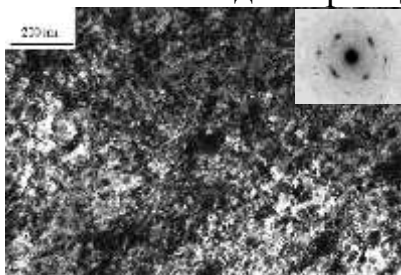


Рис. 2. Микроструктура сплава Al – 2 % Li – 3 % Cu – 0,1 % Zr.

Светлопольное изображение фрагментированной структуры после деформации $P = 4$ ГПа, $\phi = \pi$ рад и кольцевая электронограмма с рефлексами фаз T_2 и S_1 .

S_1 (Al_2LiMg) (их рефлексы обнаружены на электронограммах деформированного сплава (рис. 2)). Образовавшиеся фазы имеют форму тонких пластин. Они равномерно распределены в объеме образца.

Бриджмена при нагрузке $P = 4 - 8$ ГПа и углах поворота ϕ при каждой нагрузке от 0,5 до 16 π радиан. Деформированные образцы отжигали при 150 °С в течение 10 часов. Выбор режима отжига обусловлен тем, что он обеспечивает максимальное упрочнение сплава Al – 2% Li – 3% Cu – 0,1% Zr с крупнокристаллической структурой.

Электронно-микроскопическое исследование показало, что при нагрузке 4 ГПа структурное состояние деформированного сплава определяется углом поворота ϕ . Так, при $\phi = 0,5 \pi$ радиан сплаве формируется нерегулярная ячеистая структура (рис. 1). Границами ячеек являются широкие сплетения дислокаций. Диаметр свободной от дислокаций центральной части ячеек составляет 0,3 – 1 мкм. Некоторая размытость рефлексов на соответствующих электронограммах указывает на наличие незначительного градиента

При увеличении угла поворота до π радиан в сплаве образуются мелкодисперсные фрагменты диаметром менее 100 нм (рис. 2).

Кольцевой характер соответствующих электронограмм указывает на их большеугловую разориентацию (рис. 2).

В сплаве без добавок при тех же режимах деформации появляются микрополосы шириной до 0,1 мкм, разбитые на отдельные вытянутые фрагменты. Этот факт указывает на то, что легирование исследуемого сплава комплексной добавкой Sc + Mg эффективно ускоряет переход сплава к наноструктурному состоянию.

Возрастание угла поворота оказало влияние и на фазовый состав сильно деформированного сплава. В процессе деформации произошло растворение дисперсойдов $Al_3(Zr,Sc)_x$ и образование стабильных тройных фаз T_1 (Al_2CuLi), T_2 (Al_6CuLi_3),

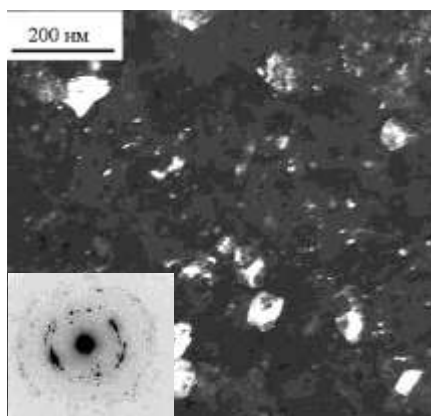


Рис. 3. Микроструктура сплава Al – 2 % Li – 3 % Cu – 0,1 % Zr. Темнопольное изображение рекристаллизованной наноструктуры и выделившихся фаз в рефлексах $(220)Al + (770)T_2 + (14.2.2)S_1$ после деформации $P = 4$ ГПа, $\varphi = 2\pi$ рад и отжига $150^\circ C$, 10 ч и кольцевая электронограмма с рефлексами фаз T_2 и S_1 .

Увеличение угла поворота от $0,5$ до 10π радиан при нагрузке 4 ГПа способствует возрастанию однородности фрагментированной структуры. Так, если при $\varphi = \pi$ радиан диаметр нанофрагментов колеблется в интервале от 70 до 300 нм, то возрастание числа поворотов приводит к сужению этого интервала: при $\varphi = 2\pi$ он составляет $100 - 150$ нм, а при $\varphi = 10\pi - 70 - 100$ нм. Возрастание нагрузки до 8 ГПа и φ до 20π радиан способствует дальнейшему измельчению фрагментированной структуры: средний диаметр фрагментов составляет ~ 50 нм (рис. 3).

Для получения в сильно деформированном сплаве стабильного состояния использовали низкотемпературный отжиг при $150^\circ C$, 10 ч, при котором

одновременно реализуются два процесса - распад пересыщенного твердого раствора и рекристаллизация. В отожженном сплаве обнаружена рекристаллизованная нанокристаллическая структура. Диаметр рекристаллизованного зерна зависит от режима сильной деформации и колеблется от 50 до 200 нм. Отжиг способствует увеличению объемной доли T_2 и S_1 -фаз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Интенсивная пластическая деформация сплава Al–2%Li–3%Cu–0,1%Zr с комплексной добавкой Sc + Mg способствует формированию равноосных нанофрагментов диаметром $50 - 100$ нм.
- Для образования в сплаве нанокристаллической рекристаллизованной структуры целесообразно использовать низкотемпературный отжиг, при котором одновременно реализуются процессы рекристаллизации и распада пересыщенного твердого раствора.
- Образование нанокристаллической структуры позволяет устранить структурные факторы, вызывающие снижение пластичности крупнокристаллического сплава Al – 2% Li – 3% Cu – 0,1% Zr.